

Untersuchungen zum Stoffhaushalt im einem stickstoffgesättigten, nordhessischen Buchenwaldökosystem: Fallstudie Zierenberg

J. EICHHORN

Hessische Forstliche Versuchsanstalt, Hann. Münden

Waldökosysteme sind vernetzte Lebensräume. Um sie zu charakterisieren steht der forstlichen Praxis die Einordnung nach Waldgesellschaften zur Verfügung. Als Waldgesellschaften werden nach der Artenzusammensetzung natürliche, annähernd gleichartige Ökosysteme verstanden. Diese sind in pflanzenökologischer Sicht durch die Standortmerkmale Klima, Vegetation und Boden sowie die Standortselemente Wuchszone, Klimafeuchte, Geländewasserhaushalt und Trophie definiert und werden als "Forstlicher Standort" beschrieben (HAFA, 1985).

Waldökosysteme erscheinen nach dieser Einordnung als relativ statische Gebilde. Dies ist jedoch nicht der Fall. Es zeigt sich, daß in allen Organisationsebenen der Waldökosysteme - von Zellorganellen bis hin zu Lebensgemeinschaften - Prozesse zu erkennen sind, die entweder selbststeuernd oder anthropogen gesteuert auftreten und zu einer Dynamik in Regelkreisläufen führen. Als Beispiel selbststeuernder Prozesse sind Veränderungen der Bestandesstruktur in Abhängigkeit von Licht, Temperatur und Feuchte zu nennen. Daneben wirken anthropogen gesteuerte Prozesse verändernd: Eingriffe des Menschen wie etwa die Streuentnahme früherer Zeiten oder die Deposition von Luftverunreinigungen übersteigen vielfach das Selbstregulationsvermögen der Systeme. Dabei wird die Schwere der Veränderungen häufig erst beim Vergleich nachfolgender mit früheren Waldgenerationen deutlich.

Zur Charakterisierung dynamischer Veränderungen in Waldökosystemen erscheint die alleinig gutachtliche Beschreibung des "Forstlichen Standortes" unzureichend. Eine wesentliche Ergänzung ist in der Quantifizierung des Stoffhaushaltes von Waldökosystemen zu sehen. Anthropogene Stoffeinträge verändern die chemischen und biologischen Lebensumstände für Fauna und Flora im Ökosystem. Stoffdepositionen entfalten ihre Wirkung direkt über die Assimilationsorgane, in bedeutenderem Umfang jedoch über die Bodenfestphase, Bodenlösung und Rhizosphäre.

Fließgleichgewichte des Stoffhaushaltes

Veränderungen durch Stoffeinträge sind am Fließgleichgewicht von Neubildung und Abbau organischer Substanz quantifizierbar (ULRICH, 1989). Photosynthese, Ionenaufnahme und Wachstum tragen zur Neubildung bei. Zum Abbau zählen dagegen Atmung, Zersetzung und Neubildung bei. Zum Abbau zählen dagegen Atmung, Zersetzung und Mineralisierung. In ökosystemarer Sicht zeigen Abweichungen von diesem Fließgleichgewicht mittelfristige Veränderungstendenzen der Ökosysteme an. Als grundlegende Meßgröße dient der Vergleich von Einträgen zu Austrägen im System. Überwiegt der Eintrag, so tritt eine Vorratsmehrung des betreffenden Stoffes ein. Überwiegt dagegen der Austrag, so zeigt sich ein Vorratsabbau. Ein leider großflächig verbreitetes Beispiel für Vorratsabbau ist in den Nährstoffverlusten der Waldböden in Folge anthropogener Säureinträge zu sehen.

Die durch Abweichungen vom Fließgleichgewicht der Stoffhaushaltsgleichung erkennbaren, schwerwiegenden Veränderungen von Waldökosystemen haben dazu geführt, daß das Forschungszentrum Waldökosysteme, Göttingen unter Leitung von Prof. Dr. Dr. h. c. ULRICH in Zusammenarbeit mit dem Bundesforschungsministerium und anderen Forschungseinrichtungen seit 1989 einen Forschungsschwerpunkt zu Stabilitätsbedingungen von Waldökosystemen begründet hat (ULRICH et al., 1991). Im Rahmen eines Fallstudienkonzeptes werden in ausgewählten Waldökosystemen Ein- und Austräge von Stoffen erfaßt und Stoff-Flüsse bilanziert. Bisher fanden als Fallstudien vor allem basenarme Ökosysteme Berücksichtigung.

Mit der Fallstudie Zierenberg wird seit Mai 1989 erstmalig ein basenreiches Buchenwaldökosystem auf Basalt interdisziplinär untersucht. Der sehr gut wüchsige, 140 jährige Buchenaltbestand der Fallstudie Zierenberg liegt in etwa 450 m Höhe über NN in nordöstlicher Exposition. Der Boden ist tief humos und außerordentlich gut basengesättigt. Werte der Basensättigung im Zwischenstammbereich um 95 % nehmen allerdings im unmittelbaren Bereich des Stammabflusses auf etwa 20 % ab. Die räumliche und zeitliche Variabilität des chemischen Bodenzustandes ist auf derartig basenreichen Standorten weitaus größer als auf stark versauerten, basenarmen Vergleichsflächen. Neben der Erfassung quantitativ bedeutsamer Elementumsätze im Sinne einer Stoffbilanzierung bestehen in Zierenberg Untersuchungsschwerpunkte an den Grenzlinien Boden und Wurzel, Atmosphäre und Blatt sowie zur Physiologie der Buche. Gegenwärtig arbeiten 14 Forschungsinstitute der Universitäten Göttingen und Mainz, der Gesamthochschule Kassel, der Hessischen Forsteinrichtungsanstalt und der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt gemeinsam an der Fragestellung. Die wissenschaftliche Leitung obliegt der Abteilung Waldschäden in der Hessischen Forstlichen Versuchsanstalt.

Stickstoff als belastender Faktor von Waldökosystemen

Für die Hessischen Wälder stellen die anthropogenen Stickstoffeinträge einen wesentlichen Standortsfaktor dar. Noch vor wenigen Jahren galt Stickstoff als der, das Wachstum der Bäume am meisten begrenzende Faktor. Heute wird jedoch vielerorts deutlich, daß die Ausbreitung einer Stickstoffliebenden Bodenvegetation dazu beiträgt, daß auf einer Reihe von Standorten und insbesondere bei gut Nährstoffversorgten, frischen Standorten höherer Lagen erhebliche Probleme bei der Verjüngung von Waldbeständen bestehen. Stickstoffgesättigte Ökosysteme besitzen häufig nur begrenzte Speichermöglichkeiten für weitere Stickstoffeinträge oder Veränderungen des im System gespeicherten Stickstoffs. Stickstoffüberschüsse und Nitratausträge sind ein wesentlicher Faktor bei der Versauerung der Wälder, die durch Nährstoffauswaschungen begleitet werden. Nitratausträge führen darüber hinaus zu Belastungen des Trinkwassers. Eine Überversorgung der Bäume durch Stickstoff erfährt zudem eine besondere Beachtung als möglicher Schadfaktor im Erscheinungsbild der Waldschäden. Stickstoff scheint sich danach in zahlreichen Wäldern vom Nährstoff zum Schadstoff zu wandeln.

Die Erfassung des Stickstoff-Haushaltes von Waldökosystemen ist jedoch außerordentlich anspruchsvoll. Stickstoff wird in unterschiedlichen chemischen Formen in das System eingetragen. Beim Austrag sind neben Nitratauswaschungen auch gasförmige und organische N-Verluste zu berücksichtigen. Da Stickstoff für die Pflanzen ein essentieller Nährstoff ist, bestehen sowohl über Wurzeln als auch über Blätter Aufnahmewege für dieses Element. Die Biochemie der N-Assimilation und -Dissimilation der Waldbäume ist ebenso wie Humusintegration und -disintegration erst ansatzweise bekannt. Zudem üben Veränderungen des Stickstoffhaushaltes weitreichende Auswirkungen auf die Ökosystemelemente Pflanzen, Tiere, Mikroorganismen und Boden aus.

Ein erster Ansatz ist in der Bilanzierung von Ein- und Austrag von Stickstoff zu sehen. Aus dieser Differenz ist ableitbar, ob die Systeme den eingetragenen Stickstoff akkumulieren beziehungsweise in die Biomasse einbinden, im Boden speichern oder abgeben. Es wird daher nachfolgend der Stickstoffeintrag verschiedener Fallstudien in Deutschland vorgestellt.

Eintrag

Die anorganischen Stickstoffeinträge in norddeutsche Buchenwaldökosysteme liegen etwa bei 1,5 - 1,8 kmol/ha*a, dies entspricht Werten von 20-25 kg N/ha*a (Abb. 1). Unterschiede zwischen der Fallstudie Zierenberg und anderen Buchen-Fallstudien (3. Ber. FBW, 1989) in Deutschland ergeben sich in der anteiligen Bedeutung von $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$. Während in Göttingen, Bovenden und dem Solling $\text{NH}_4\text{-N}$ mit jeweils 0,8 bis 0,9 kmol/ha*a gegenüber 0,7 bis 0,8 kmol/ha*a $\text{NO}_3\text{-N}$ überwiegt, übersteigt bei der Fallstudie Zierenberg deutlich der Wert des nitrat- den des ammoniumgebundenen Stickstoffes.

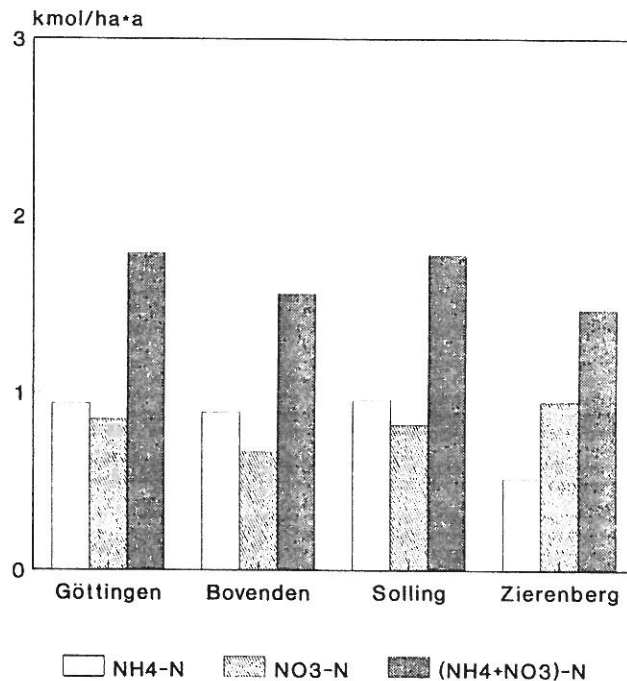
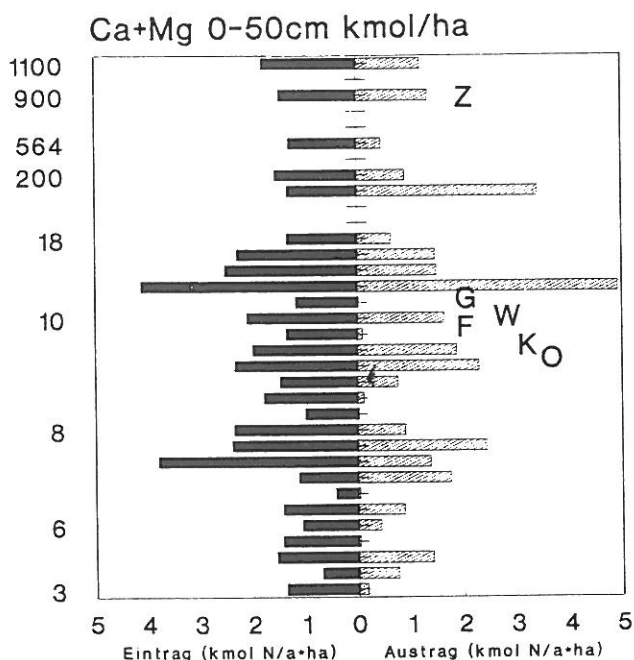


Abbildung 1
N-Eintrag in Buchenwaldökosysteme in Norddeutschland

Auch ein Vergleich des N-Eintrages in Fichtenwälder der Bundesrepublik und Hessens zeigt, daß das Eintragsverhältnis von NO₃-N zu NH₄-N in Hessen etwa bei 60 % zu 40 % liegt, in der übrigen Bundesrepublik dagegen bei 50 % zu 50 %. Hessische Wälder sind danach sowohl bei Fichte als auch bei Buche hinsichtlich NO₃-N etwa durchschnittlich, hinsichtlich NH₄-N dagegen unterdurchschnittlich belastet.

N-Austräge

In der Abbildung 2 sind die anorg. N- Ein- und Austräge sämtlicher Fallstudien in Deutschland wiedergegeben. Als Gliederungsmerkmal der Ordinate findet die Gesamtmenge an austauschbar gebundenem Calcium und Magnesium in kmol/ha in 0-50 cm Bodentiefe Verwendung. Die Betrachtung der N-Austräge zeigt, daß diese von Fallstudie zu Fallstudie sehr unterschiedlich sind. Während im Hils (Niedersächsisches Forstamt Grünenplan) fast ein N-Austrag in Höhe von 5 kmol/ha*a zu messen ist und Fallstudien in Hessen vielfach Austräge zwischen 1,5 und 2,5 kmol/ha*a aufweisen, lassen sich auch einzelne Flächen erkennen, die

*Abbildung 2*

Stickstoff: Vergleich von Eintrag und Austrag in Fallstudien der Bundesrepublik Deutschland (kmol N/a·ha) geordnet nach der Gesamtmenge an austauschbarem Calcium und Magnesium in 0-50 cm Bodentiefe (FBW 1989; BALAZS, 1991; EICHORN, 1991). Buchstaben kennzeichnen Fallstudien in Hessen: Z: Zierenberg; G: Grebenu; W: Witzenhausen; F: Frankenberg; K: Königstein; O: Odenwald; S: Spessart

praktisch keinerlei N-Austräge haben. In Hessen sind hierfür als Beispiel die beiden Hauptmeßstationen Grebenu und Frankenberg anzuführen.

Bilanzierung von N-Ein- und Austrägen

Die Abbildung 3 gibt erneut die Ergebnisse des im 3. Ber. des Forschungsbeirates Waldschäden/Luftverunreinigungen (1989) sowie hessischer Fallstudien (EICHORN, 1991; BALAZS, 1991) wieder. Bei der überwiegenden Anzahl der untersuchten Wälder überwiegen die N-Einträge deutlich gegenüber den Austrägen; daraus ist zu schließen, daß viele Waldökosysteme den eingetragenen Stickstoff ganz oder zumindest teilweise akkumulieren. In einigen anderen Sys-

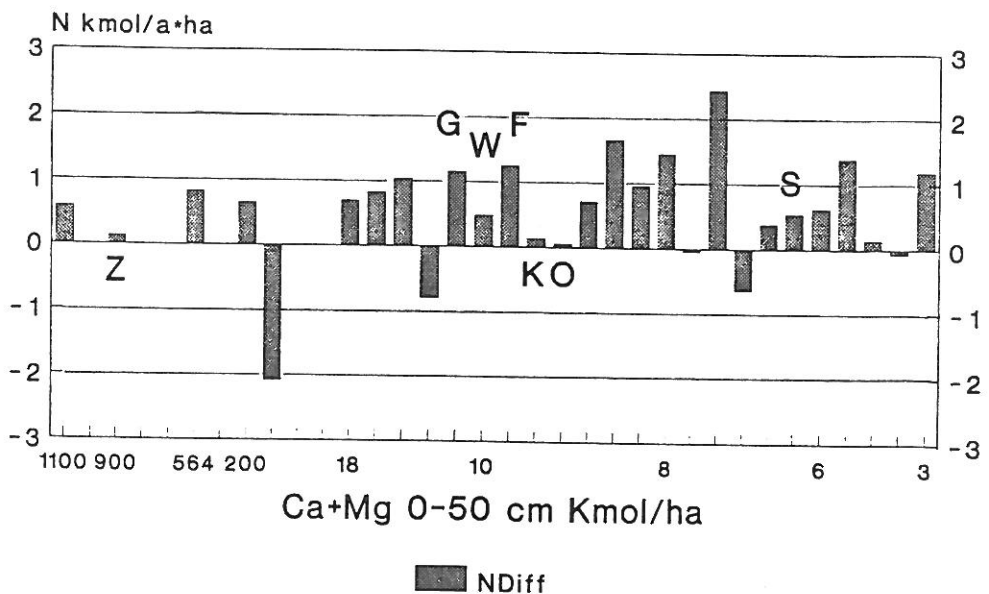


Abbildung 3

Stickstoff: N-Bilanz (Differenz Eintrag - Austrag) in Fallstudien der Bundesrepublik Deutschland (kmol N/a.ha) geordnet nach der Gesamtmenge an austauschbarem Calcium und Magnesium in 0-50 cm Bodentiefe. Buchstaben kennzeichnen Fallstudien in Hessen: Z: Zierenberg; G: Grebenau; W: Witzenhausen; F: Frankenberg; K: Königstein; O: Odenwald; S: Spessart

temen entspricht dagegen der N-Eintrag in der Größenordnung dem N-Austrag. Diese Wälder sind N-gesättigt.

KÖLLING (1991) empfiehlt hinsichtlich einer Stickstoffsättigung von Waldökosystemen die Definition von AGREN (1983, 1988): "Ein Ökosystem wird stickstoff-gesättigt genannt, wenn die Stickstoffverluste aus dem System die Größenordnung der Einträge erreichen oder sie übersteigen".

Eine erste N-Bilanzierung der Fallstudie Zierenberg zeigt, daß die N-Austräge mit 1,35 kmol/ha*a ($(\text{NO}_3 + \text{NO}_4) - \text{N}$) annähernd die Größenordnung der N-Einträge von 1,47 kmol/ha*a im Bestandesniederschlag erreichen (EICHHORN, 1991). Dies deutet darauf hin, daß sich das Buchenwaldökosystem in der Phase einer N-Sättigung befindet. Am Beispiel der Fallstudie Zierenberg wird aber auch deutlich, daß ein alleiniger Vergleich von N-Einträgen und N-Austrägen kein abschließendes Bild liefert.

Analysen des Nitratgehaltes in einer unterhalb der Versuchsfläche gelegenen Trinkwasserquelle sind in den letzten drei Jahrzehnten von etwa 5 mg NO_3/l auf über 20 mg NO_3/l angestiegen. Diese Ergebnisse belegen eine gerichtete Ent-

wicklung hin zu deutlich höheren Nitratausträgen, wenn auch durch den bisher erreichten Wert der EG-Richtwert für Trinkwasser nicht überschritten wird.

In Zierenberg halten sich Ein- und Austräge zwar noch die Waage, erste Ergebnisse deuten jedoch daraufhin, daß im System stabile Stickstoffverbindungen in lösliche und pflanzenaufnehmbare N-Formen (Nitrat bzw. Ammonium) umgewandelt wurden und so eine deutliche Anregung des internen N-Kreislaufes stattgefunden hat.

JOCHHEIM (1991) schätzt die im Boden insgesamt gespeicherte N-Menge auf 10-12 t. Eine Austragsmenge von ca. 20 mg NO_3/l läßt darauf schließen, daß jährlich lediglich 0,13 % des N-Vorrates ausgetragen werden. Es besteht danach zahlenmäßig ein erheblicher Unterschied zwischen löslichen und festgelegten N-Formen (N-Vorrat) im Ökosystem. Es ist festzustellen, daß selbst geringe Veränderungen des im Mineralboden gespeicherten N das System an löslichem N überschwemmen können.

Veränderungen am Humuskörper können möglicherweise durch Säureeinträge induziert werden. Nach ULRICH (1984) können infolge von saurer Deposition und freien Al^{3+} -Ionen in der Bodenlösung Störung der Repolimerisation von Stickstoffverbindungen auftreten. Ein derartiger Humusvorratsabbau oder Humusdesintegration des Mineralbodenhumus führt über verstärkte Nitrat- und Basenausträge zu einer Versauerung der Waldökosysteme. Die Phase der Humusdesintegration wird daher als Anfangsphase einer Ökosystemdestabilisierung verstanden.

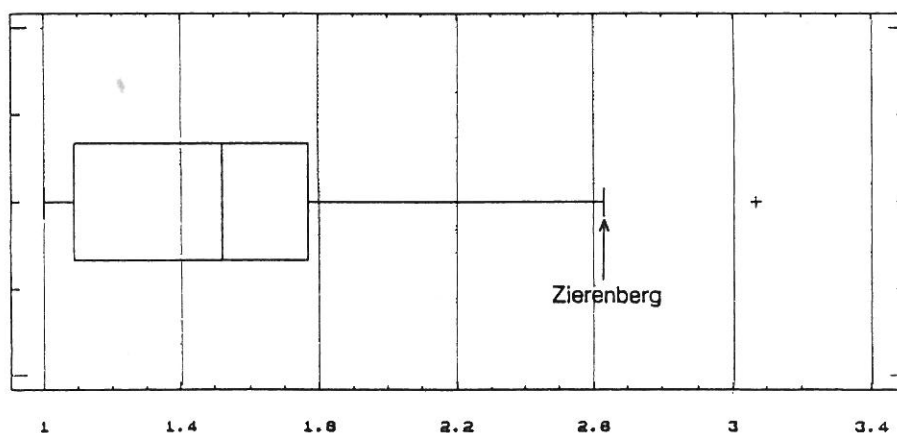


Abbildung 4

Anreicherung con N bei der Kronenpassage. N-Deposition im Freilandniederschlag dividiert durch Bestandesniederschlag unter Buche. Ergebnisse der Fallstudie Zierenberg im Vergleich zu Fallstudien des 3. Ber. d. F. Beirates Waldschäden Luftverunreinigungen (1989) sowie Hess. Fallstudien (Balazs, 1991) Angabe als Quartile, Median sowie Ausreißer in Form eines Box- und Whisker-Plots.

Ein besonders augenfälliger Hinweis ist in der flächendeckend dominierenden Bodenvegetation aus Stickstoffweisern zu sehen. Unter dem fast geschlossenen Schirm der 140-jährigen Altbuchen hat sich eine flächendeckend geschlossene *Urtica dioica* - (Brennnessel) Schicht entwickelt. Die einzelnen Pflanzen erreichen Höhen von bis zu 2 m. ROLOFF und HUBENY (1991) konnten nachweisen, daß das Vorkommen von *Urtica dioica* eng mit dem Nitratgehalt der Bodenlösung des Wurzelraumes korreliert ist.

Aus dem Quotienten N-Deposition im Bestandesniederschlag unter Buche dividiert durch Freiflächenniederschlag sind Hinweise auf eine Anreicherung von Stoffen bei der Kronenpassage abzuleiten. Für die Fallstudie Zierenberg ergibt sich für den Quotienten ein Wert von 2,7 (Abb. 4). Im Vergleich der 30 bundesdeutschen Fallstudien findet sich keine andere Laubholz- und lediglich eine einzige Nadelholzfallstudie, die einen ähnlich hohen Anreicherungsfaktor für Stickstoff im Bestandesniederschlag aufweist. Anreicherungen bei der Kronenpassage können durch Abwaschung sedimentierter und angelagerter Teilchen oder aber durch Auswaschung von Pflanzeninhaltsstoffen begründet sein. Vieles spricht dafür, daß die N-Anreicherung im Bestandesniederschlag in Zierenberg auf Auswaschungsvorgängen und einen angeregten internen Kreislauf zurückzuführen sind. Als interner Kreislauf wird hier die Abfolge löslichen N im Boden - Wurzelaufnahme - Transpirationsstrom - Aus- bzw. Abwaschung von Blattoberflächen und Bestandesniederschlag verstanden.

In ökosystemarer Hinsicht kommt dem internen Kreislauf wie auch der N-Aufnahme in die Bodenvegetation die Funktion eines temporären Speichers zu, der als Regulationsgröße das System vor allzu raschem Nitratverlust schützt. Nitratausträge bedeuten nicht nur den Verlust von Stickstoff, vielmehr gehen dem System mit jedem Nitrations basische Kationen verloren, die zu einer Nährstoffverarmung und Versauerung beitragen.

Vieles deutet daraufhin, daß die temporäre Speicherung löslicher Stickstoffverbindungen nur von kurzer Dauer ist. Aus den langjährigen Beobachtungen des früheren, für die Versuchsfläche Zierenberg zuständigen Revierleiters geht hervor, daß sich die Brennesselvegetation in der heutigen Form erst vor gut 10 Jahren entwickelt hat.

Für die Entwicklung der Ökosysteme folgt, daß derartige Phasen temporärer Kreisläufe und temporärer Speicherung labile Zustände sind und schon geringe Veränderungen der Rahmenbedingungen zu schwerwiegenden Destabilisierungen führen können.

Die Bedeutung des löslichen Stickstoffes im System der Fallstudie Zierenberg ist auch an der Tatsache zu erkennen, daß aufgrund terrestrischer Kronenbonituren der Buchenaltbestand insgesamt als schwach geschädigt einzustufen ist. Trotz guter Nährstoffversorgung erreichen einzelne Buchen bis zu 50 % Blattverlust. Die Nitratgehalte im Ast-Xylemsaft von "kranken" Buchen sind im Sommer etwa doppelt so hoch wie diejenigen der "gesunden" Bäume (EBBEN & GLAVAC, 1991). Stickstoff scheint danach auch in Beziehung zum Schadzustand der Buchen zu stehen.

Vergleichende Auswertungen bodenchemischer Parameter und morphologischer Wurzelmerkmale ergeben, daß in der Bodentiefe 0-10 cm die Anzahl der Wurzelspitzen und Wurzelbüschel positiv mit dem N-Gehalt korreliert sind.

Die Ergebnisse der Fallstudie Zierenberg zeigen, daß unter der Rahmenbedingung hoher Stickstoffeinträge Untersuchungen zum Stickstoffhaushalt von großer Bedeutung für das Verständnis von Stoffkreisläufen in Waldökosystemen, das Schadbild der neuartigen Waldschäden und von waldbaulichen Behandlungsstrategien sind.

Literatur

- AGREN, G. I., 1983. Model analysis of some consequences of acid precipitation on forest growth. In: Ecological effects of acid deposition. National Swedish Environment. Board Report. PM. 1636. 233-244.
- AGREN, G. I. & BOSATTA, E., 1988. Nitrogen Saturation of Terrestrial Ecosystems. Environmental Pollution. **54**. 185-197.
- BALAZS, A., 1991. Niederschlagsdeposition in Waldgebieten des Landes Hessen. - Ergebnisse von Messungen an den Meßstationen der "Waldökosystemstudie Hessen". Forschungsberichte Hess. Forstl. Versuchsanstalt, Hann. Münden. **11**. 1-156.
- EBBEN, U. & GLAVAC, V., 1991. Analyse des Xylemsaftes und anderer Parameter des bauminternen Mineralstoffhaushaltes. In: Stress in einem Buchenwald-ökosystem in der Phase der Stickstoffsättigung (Fallstudie Zierenberg). Forschungsberichte Hess. Forstl. Versuchsanstalt, Hann. Münden. **14**.
- EICHHORN, J., 1991. Stoffeintrag und Stoffhaushalt. In: Stress in einem Buchenwaldökosystem in der Phase der Stickstoffsättigung (Fallstudie nder Zierenberg). Forschungsberichte Hess. Forstl. Versuchsanstalt, Hann. Münden. **14**.
3. Bericht des Forschungsbeirates Waldschäden/Luftverunreinigungen der Bundesregierung und der Länder, 1989. Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- HAFEA, 1985. Hessische Anweisung für Forsteinrichtungsarbeiten; Staatsanzeiger für das Land Hessen. **32**.
- KÖLLING, CH., 1991. Stickstoffsättigung von Waldökosystemen. Allg. Forstz. **10**. 513-517.
- ROLOFF, A. & HUBENY, C., 1991. Vegetationskundliche Fragestellungen auf der Fläche Zierenberg. In: Stress in einem Buchenwaldökosystem in der Phase der Stickstoffsättigung (Fallstudie Zierenberg). Forschungsberichte Hess. Forstl. Versuchsanstalt, Hann. Münden. **14**.
- JOCHHEIM, H., 1991. Chemische Bodeneigenschaften der Fest- und Lösungsphase in einem Buchenwaldökosystem in der Phase der Humusdisintegration. In: Stress in einem Buchenwaldökosystem in der Phase der Stickstoffsättigung (Fallstudie Zierenberg). Forschungsberichte Hess. Forstl. Versuchsanstalt, Hann. Münden. **14**.

- ULRICH, B., 1989. In: 3. Bericht des Forschungsbeirates Waldschäden/Luft-verunreinigungen der Bundesregierung und der Länder. Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- ULRICH, B., 1984. Stability and Destabilization of Central European Forest. In: Trends in Ecological Research for the 1980s. (Eds.: COOLLEY, J. H. & F. B. GOLLEY). Plenum Publ. Corp.
- ULRICH, B., 1991. Beitrag zur Tagung der Ökosystemforschungszentren in Göttingen vom 24-26. 10. 1990. In: Berichte des Forschungszentrums Wald-ökosysteme. 22.